

五角形断面桁の静的空力特性に与える 底面傾斜角の影響に関する研究

野田 辰徳¹・久保 喜延²・木村 吉郎³・加藤 九州男³・大窪 一正⁴・吉田 健太⁵

¹学生会員 九州工業大学大学院 工学府 建設社会工学専攻
(〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)
E-mail:h585302t@tobata.isc.kyutech.ac.jp

²フェロー 九州工業大学大学院 工学研究院 建設社会工学研究系
(〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)
E-mail: kubo@civil.kyutech.ac.jp

³正会員 九州工業大学大学院 工学研究院 建設社会工学研究系
(〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)

⁴正会員 鹿島技術研究所 都市防災・風環境グループ (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

⁵非会員 九州工業大学大学院 工学研究科 建設社会工学専攻 (研究当時)
(〒804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)

吊形式橋梁に風が作用すると空力弾性振動が発生する場合があります。空力弾性振動が発生し難い吊形式橋梁用桁断面の開発が必要である。そこで、空力的付加部材を使用することなく耐風性が得られ、かつ経済性に優れていると考えられる五角形断面桁に着目し、静止状態における各種風洞実験から五角形断面桁の静的空力特性およびその静的空力特性が底面傾斜角によって大きく異なるメカニズムに関する検討を行った。その結果、底面傾斜角が12°付近である場合に空力的により安定であることを示した。さらに、底面傾斜角が12°である場合、底面傾斜部の頂点からの剥離が14°の場合よりも小さく、底面での表面圧力分布が14°の場合とは大きく異なり、五角形断面桁の静的空力特性が底面傾斜角によって大きく異なることを明らかにした。

Key Words : pentagonal cross-section girder, lower flange slope, lift force, flow separation

1. 序論

近年の我国における架橋技術は、めざましい発展を遂げており、明石海峡大橋や多々羅大橋などの橋梁が建設された。我国においては超長大橋の需要は少なくなってきたが、交通量がさほど多くない島嶼間の架橋のような、2車線程度の橋梁の需要は依然あるといえる。

一方、長大橋に採用されることが多い吊形式橋梁は、剛性の低い構造物であり、その実現に向けて、空力安定性の検討は重要な課題である。また、長大橋の建設には莫大な建設費用を要し、建設コスト削減が強く要求される現在において、長大橋の建設を可能にするためには、経済性についての検討が必要である。

空力弾性振動を抑制する手法の一つとして、フェアリング等の空力的付加部材を設置する方法¹⁾が良く知られ

ているが、近年では経年劣化による維持管理等の問題が生じており、空力的付加部材の設置は好ましくない。

そこで著者らは、幅員が狭い吊形式橋梁を対象として、空力的付加部材を使用しなくても耐風性が得られると考えられる五角形断面桁(図-1)に着目した^{2,3)}。五角形断面桁は従来の六角形断面桁と比較すると、溶接線が少なく、空力的付加部材を使用しないため、経済性および維持管理性に優れている。

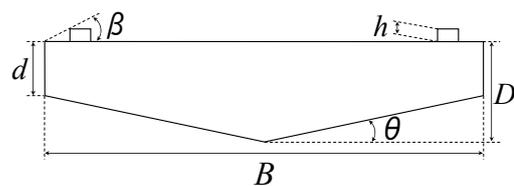


図-1 五角形断面桁断面

本論文では、これまでに得られている五角形断面桁に関する知見を踏まえ、五角形断面桁を対象として、静止状態での各種風洞実験(三分力測定, 可視化実験および熱線流速計による流速測定, 表面圧力測定)を行い、五角形断面桁の静的空力特性を明確にし、五角形断面桁の静的空力特性が底面傾斜角によって大きく異なるメカニズムに関して検討することを目的としている。

2. 既往の研究

既往の研究^{2), 3)}により、五角形断面桁の対風特性について、以下に示す知見が得られている。

(1) 上面剥離干渉角 β

五角形断面桁におけるウェブ隅角部を1次剥離点、地覆隅角部を2次剥離点とし、1次剥離点と2次剥離点を結ぶ直線と五角形断面桁上面からなる角度 β (図-1)を、上面剥離干渉角と呼ぶ。底面傾斜角 θ を 13° に固定し、剥離干渉法の考え方^{4), 5)}に基づき、地覆高 h を変化させることで β を $27^\circ, 30^\circ, 33^\circ$ と変化させ、2自由度振動応答実験を行った。曲げねじれ連成フラッターの発生は見られなかったため、ここでは、ねじれ振動の実験結果をねじれ応答図として図-2に示す。 $\beta=27^\circ$ の場合は、低風速域で限

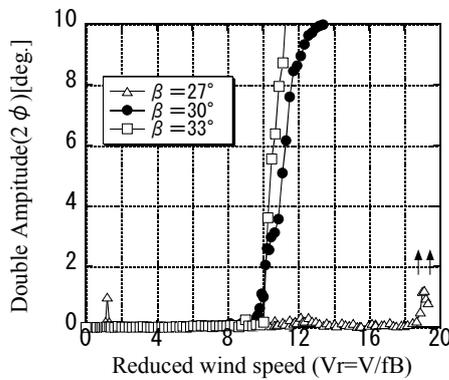


図-2 上面剥離干渉角 β を変化させた場合のねじれ応答図³⁾

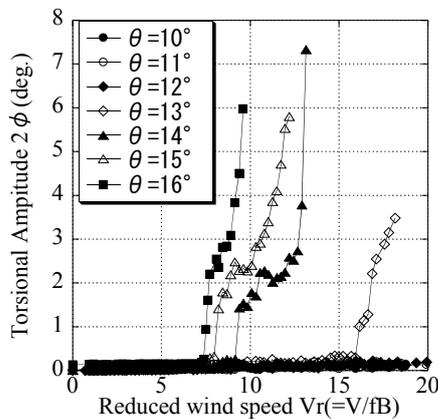


図-3 底面傾斜角 θ を変化させた場合のねじれ応答図³⁾

定振動である渦励振の発生が見られるものの、高風速域でのフラッターの発現風速が高くなっており、 $\beta=30^\circ, 33^\circ$ の場合と比べて空力的により安定している。しかし、 $\beta=27^\circ$ の場合が最適であるかは解明できていない。

(2) 底面傾斜角 θ

前節の実験結果より、曲げねじれ連成フラッターの発生が見られなかったため、五角形断面桁の上面剥離干渉角を $\beta=27^\circ$ に固定し、ウェブ高 d は変化させず、桁高 D を変化させて、底面傾斜角 θ を 10° から 16° ($B/D=4.76\sim 6.45$)まで 1° 刻みで変化させ、ねじれ1自由度振動応答実験を行った。実験結果をねじれ応答図として図-3に示す。これより、 $\theta=13^\circ\sim 16^\circ$ の範囲ではフラッターが発現しているが、 $\theta=10^\circ\sim 12^\circ$ の範囲では発現していない。つまり、底面傾斜角が大きくなるに従って、より低風速でフラッターが発現する傾向にあると考えられる。

また、同様の実験ケースにおいて、三分力測定実験により得られた、底面傾斜角 θ と迎角 $\alpha=0^\circ$ における揚力係数 C_L の関係を図-4に示す。これより、底面傾斜角が $\theta=10^\circ\sim 13^\circ$ では負の値を、 $\theta=14^\circ\sim 16^\circ$ では正の値を示している。揚力が負であるということは、下向きに揚力が働くということであり、吊形式橋梁において揚力が下向きに働くと、ケーブルに引張力が作用し、構造系全体として剛性が増加し、耐風性が向上する可能性があると考えられる。

以上のことは、五角形断面桁は上面剥離干渉角が $\beta=27^\circ$ の場合においては、底面傾斜角が $\theta=10^\circ\sim 12^\circ$ の範囲にある場合に、耐風性が優れていることを示している。

3. 五角形断面桁の三分力特性

本論文では、既往の研究において、揚力係数が $\theta=12^\circ$ から 14° にかけて大きく変化していることに着目し、三分力測定実験を行い、底面傾斜角 θ についてより詳細に検討した。

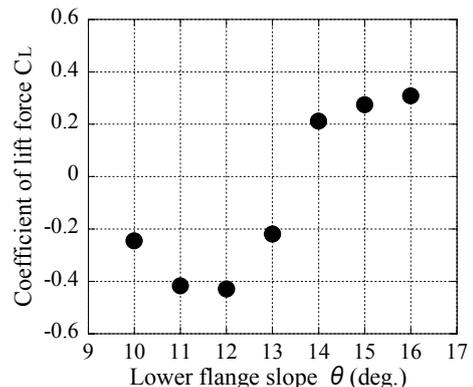


図-4 底面傾斜角 θ と揚力係数 C_L の関係³⁾

(1) 実験概要

実験は一様流中で行い、九州工業大学付属の境界層型波浪風洞縮流部(測定断面：高さ1800mm×幅1100mm)にて実施した。実験用模型として、縮尺率が1/40～1/50程度に相当する2次元剛体模型を用いた。桁断面は図-1に示す五角形断面であり、桁幅Bは264.0mm、模型長は833.0mmである。

実験ケースについては、上面剥離干渉角を $\beta=27^\circ$ に固定し、幅員桁高比が $B/D=4.0, 4.5, 5.0$ のそれぞれの場合において、底面傾斜角 θ を 11.0° から 14.0° まで 0.5° 刻みに変化させた。また、測定風速は、4～10m/sの範囲で変化させて模型が共振しない風速とし、迎角 α は -6° から $+6^\circ$ まで 2° 刻みで変化させた。なお、測定風速範囲内で各空気力係数は大きく変化しなかったため、レイノルズ数の影響は小さいと考えられる。

(2) 実験結果および考察

抗力、揚力、空力モーメントの各空気力と気流迎角 α の定義を図-5に、各空気力係数の定義式を式(1)～(3)に示す。

測定結果を、図-6～8に各空気力係数と気流迎角の関係、図-9に迎角が $\alpha=0^\circ$ の場合の各空気力係数と底面傾斜角の関係として示す。

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 D} \quad (1)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U^2 B} \quad (2)$$

$$C_M = \frac{F_M}{\frac{1}{2} \rho U^2 B^2} \quad (3)$$

C_D : 抗力係数, C_L : 揚力係数, C_M : 空力モーメント係数
 F_D : 単位長さあたりの抗力, F_L : 単位長さあたりの揚力
 F_M : 単位長さあたりの空力モーメント, U : 風速

a) 空気力係数と迎角 α の関係

図-6～8の(a)より、抗力係数の値は $B/D=4.0, 4.5$ の場合、 $\theta=13.5^\circ, 14.0^\circ$ のケースよりも $\theta=11.0^\circ \sim 13.0^\circ$ のケースの方が相対的に値が小さい。また、 $\theta=13.5^\circ, 14.0^\circ$ のケースでは迎角が変化すると、抗力係数の値も大きく変化している。しかし、 $\theta=11.0^\circ \sim 13.0^\circ$ のケースでは迎角が変化してもさほど大きく変化していない。 $B/D=5.0$ の場合、

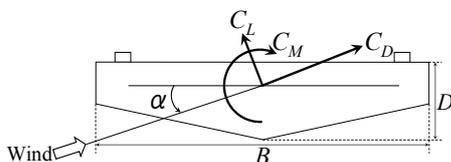
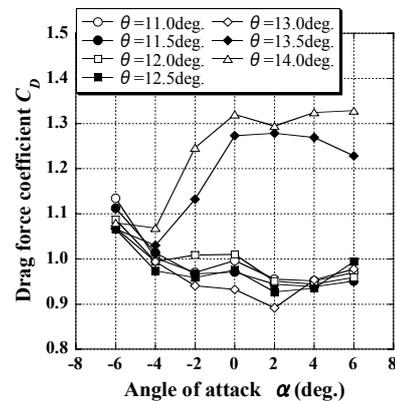


図-5 空気力係数および迎角の定義

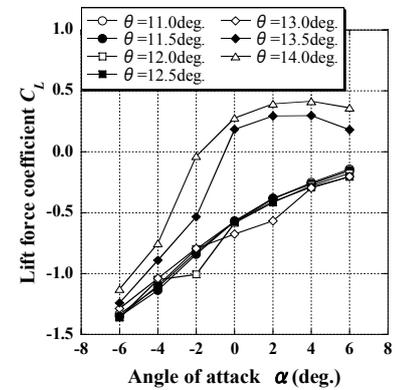
$\theta=13.0^\circ \sim 14.0^\circ$ のケースよりも $\theta=11.0^\circ \sim 12.5^\circ$ のケースの方が相対的に値が小さい。また、 $\theta=11.0^\circ \sim 12.5^\circ$ のケースでは迎角が変化しても $\theta=13.0^\circ \sim 14.0^\circ$ のケースのように抗力係数の値は大きく変化していない。

図-6～8の(b)より、揚力係数の値は $B/D=4.0, 4.5$ の場合は $\theta=13.5^\circ, 14.0^\circ$ のケース、 $B/D=5.0$ の場合は $\theta=13.0^\circ \sim 14.0^\circ$ のケースにおいては $\alpha=0^\circ$ 以上になると正の値を示し、 $\alpha=-2^\circ$ 以下になると負の値を示している。一方、 $B/D=4.0, 4.5$ の場合は $\theta=11.0^\circ \sim 13.0^\circ$ のケース、 $B/D=5.0$ の場合は $\theta=11.0^\circ \sim 12.5^\circ$ のケースにおいては迎角が変化しても常に負の値を示している。

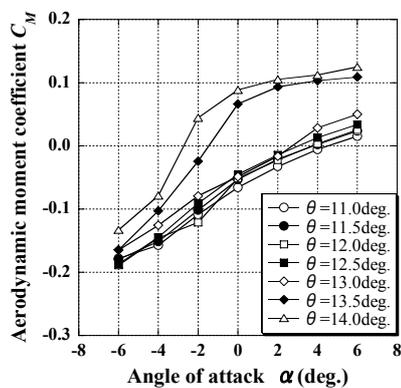
また、揚力係数と迎角の関係より、五角形断面桁にお



(a) 抗力係数 C_D



(b) 揚力係数 C_L



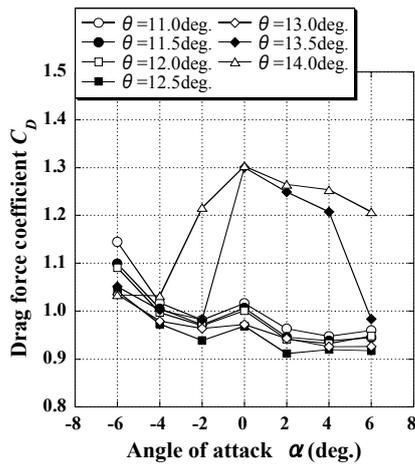
(c) 空力モーメント係数 C_M

図-6 空気力係数と迎角 α の関係($B/D=4.0$)

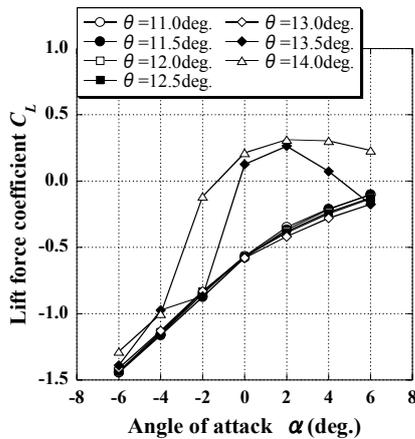
いては、正の迎角よりも負の迎角にある方が負の揚力係数の値が大きい。2. 既往の研究でも述べたように、揚力係数の値が負であると、吊形式の橋梁においては、構造系全体として剛性が増加する可能性が考えられ、負の迎角の方がより安定な静的空力特性を有すると考えられる。

図-6~8の(c)より、空力モーメント係数の値は $B/D=4.0$, 4.5 の場合は、 $\theta=14.0^\circ$ のケースでは $\alpha=-4^\circ$ 以下、 $\theta=13.5^\circ$ のケースでは $\alpha=-2^\circ$ 以下、 $\theta=11.0^\circ\sim 13.0^\circ$ のケースでは

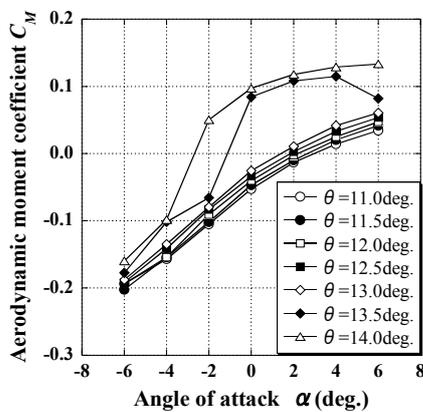
$\alpha=+2^\circ$ 以下になると負の値を示している。また $\theta=11.0^\circ\sim 13.0^\circ$ のケースでは、迎角が変化しても、 $\theta=13.5^\circ$, 14.0° のケースのような空力モーメント係数の値の大きな変化は見られない。 $B/D=5.0$ の場合は、 $\theta=14.0^\circ$ のケースでは $\alpha=-6^\circ$ 以下、 $\theta=13.0^\circ$, 13.5° のケースでは $\alpha=-4^\circ$ 以下、 $\theta=11.0^\circ\sim 12.5^\circ$ のケースでは $\alpha=0^\circ$ 以下になると負の値を示している。また $\theta=11.0^\circ\sim 12.5^\circ$ のケースでは、迎角が変化しても、 $\theta=13.0^\circ\sim 14.0^\circ$ のケースのような空力モーメント係数の値の大きな変化は見られない。



(a) 抗力係数 C_D

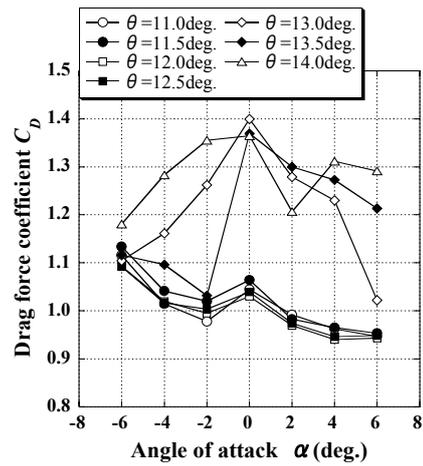


(b) 揚力係数 C_L

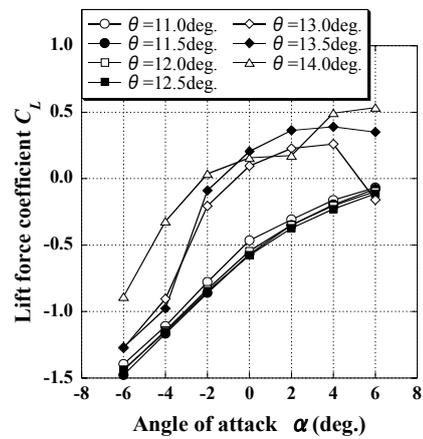


(c) 空力モーメント係数 C_M

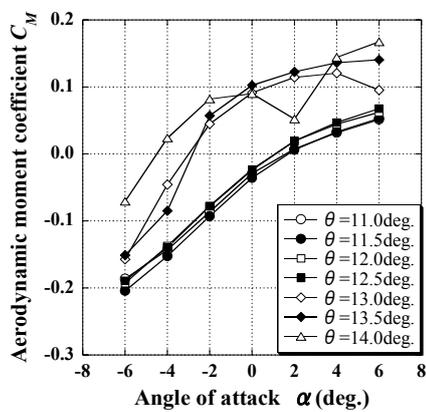
図-7 空気力係数と迎角 α の関係($B/D=4.5$)



(a) 抗力係数 C_D



(b) 揚力係数 C_L



(c) 空力モーメント係数 C_M

図-8 空気力係数と迎角 α の関係($B/D=5.0$)

以上の空気力係数と迎角 α の関係では、 $B/D=4.0$, 4.5 の場合は $\theta=11.0^\circ\sim 13.0^\circ$, $B/D=5.0$ の場合は $\theta=11.0^\circ\sim 12.5^\circ$ の範囲では、迎角 α が変化しても各空気力係数の値は大きく変化しない。これは、 $B/D=4.0$, 4.5 の場合は $\theta=11.0^\circ\sim 13.0^\circ$, $B/D=5.0$ の場合は $\theta=11.0^\circ\sim 12.5^\circ$ の範囲にある場合、迎角 α が変化しても周辺の流れ場は大きく変化しないことが原因となっている可能性が推察される。

b) 空気力係数と底面傾斜角 θ の関係

図-9(a)より、迎角 $\alpha=0^\circ$ における抗力係数は、 $B/D=4.0$, 4.5 の場合は $\theta=13.5^\circ\sim 14.0^\circ$ のケース、 $B/D=5.0$ の場合は $\theta=13.0^\circ\sim 14.0^\circ$ のケースにおいて、 $C_D=1.27\sim 1.40$ 程度となっている。また、 $B/D=4.0$, 4.5 の場合は $\theta=11.0^\circ\sim 13.0^\circ$ のケース、 $B/D=5.0$ の場合は $\theta=11.0^\circ\sim 12.5^\circ$ のケースにおいて、迎角 $\alpha=0^\circ$ における抗力係数は $C_D=0.93\sim 1.06$ 程度の値を示している。

図-9(b)より、迎角 $\alpha=0^\circ$ における揚力係数は、 $B/D=4.0$, 4.5 の場合は $\theta=13.5^\circ\sim 14.0^\circ$ のケース、 $B/D=5.0$ の場合は $\theta=13.0^\circ\sim 14.0^\circ$ のケースにおいて、 $C_L=0.10\sim 0.28$ 程度と正の値を示している。これに対して、 $B/D=4.0$, 4.5 の場合は $\theta=11.0^\circ\sim 13.0^\circ$ のケース、 $B/D=5.0$ の場合は $\theta=11.0^\circ\sim 12.5^\circ$ のケースにおいて、迎角 $\alpha=0^\circ$ における揚力係数は $C_L=-0.67\sim -0.47$ 程度と負の値を示している。

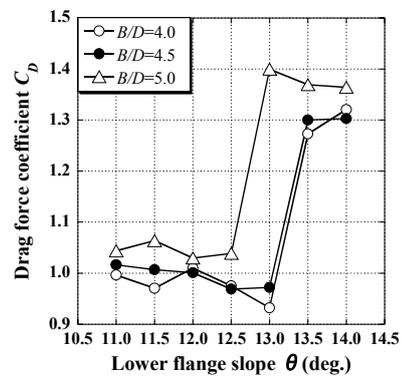
図-9(c)より、迎角 $\alpha=0^\circ$ における空力モーメント係数においても、抗力係数や揚力係数と同様の傾向を示しており、 $B/D=4.0$, 4.5 の場合は $\theta=13.5^\circ\sim 14.0^\circ$ のケース、 $B/D=5.0$ の場合は $\theta=13.0^\circ\sim 14.0^\circ$ のケースにおいて、 $C_M=0.07\sim 0.10$ 程度と正の値を示している。これに対して、 $B/D=4.0$, 4.5 の場合は $\theta=11.0^\circ\sim 13.0^\circ$ のケース、 $B/D=5.0$ の場合は $\theta=11.0^\circ\sim 12.5^\circ$ のケースにおいて、空力モーメント係数は $C_M=-0.07\sim -0.02$ 程度と負の値を示している。

以上の迎角 $\alpha=0^\circ$ における空気力係数と底面傾斜角 θ の関係では、各空気力係数の値は、 $B/D=4.0$, 4.5 の場合では、 $\theta=11.0^\circ\sim 13.0^\circ$ のケースの方が $\theta=13.5^\circ\sim 14.0^\circ$ のケースよりも小さく、 $B/D=5.0$ の場合では、 $\theta=11.0^\circ\sim 12.5^\circ$ のケースの方が $\theta=13.0^\circ\sim 14.0^\circ$ のケースよりも小さい。これは、底面傾斜角 θ が $B/D=4.0$, 4.5 の場合では $\theta=11.0^\circ\sim 13.0^\circ$, $B/D=5.0$ の場合では $\theta=11.0^\circ\sim 12.5^\circ$ の範囲にある場合、上面側の流速と比較して、下面側の流速の方が速いことが原因となって、下向きの揚力が働いている可能性が推察される。また、下面の頂点からの剥離が小さいために、下面の下流側および背面に働く負圧の絶対値が小さく、抗力係数および空力モーメント係数が小さい値となっている可能性が考えられる。

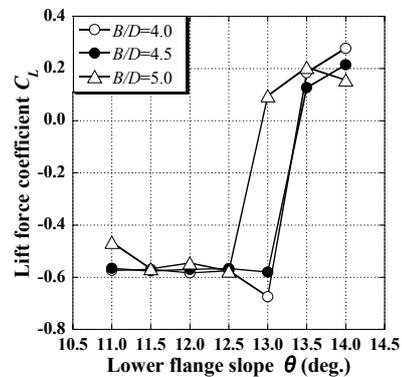
以上の三分力測定実験の結果より、上面剥離干渉角を $\beta=27^\circ$ とした場合、 $B/D=4.0$, 4.5 の場合は $\theta=11.0^\circ\sim 13.0^\circ$, $B/D=5.0$ の場合では $\theta=11.0^\circ\sim 12.5^\circ$ の範囲で、抗力係数の値が小さく、迎角の変化に対して抗力係数の値はさほど

変化しない。また、迎角に関わらず揚力係数が負の値を示しており、吊形式橋梁においては構造系全体として剛性が増加する可能性が考えられる。これらのことから、底面傾斜角 θ がこれらの範囲において、より安定的な静的空力特性を有すると考えられる。しかし、 $B/D=4.0$, 4.5 の場合は $\theta=13.0^\circ$ から 13.5° にかけて、 $B/D=5.0$ の場合は $\theta=12.5^\circ$ から 13.0° にかけて各空気力係数の値が大きく変化している。この空気力係数の変化が大きい θ の範囲に近い断面形状を用いた場合、不安定な現象が生じる可能性がある。そのため、実橋に用いることができる底面傾斜角は、 $\theta=11.0^\circ$ から 12.0° であると考えられる。

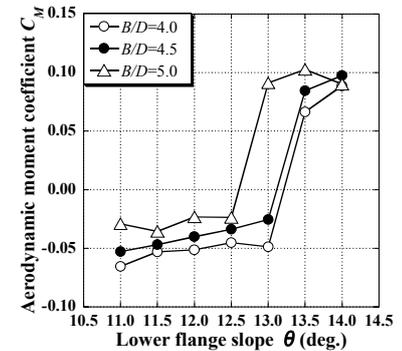
また、五角形断面桁の静的空気力特性が底面傾斜角 θ に大きく依存し、 $\theta=12.0^\circ\sim 14.0^\circ$ の僅か 2° の違いで、大きく異なるということがわかる。



(a) 抗力係数 C_D



(b) 揚力係数 C_L



(c) 空力モーメント係数 C_M

図-9 空気力係数と底面傾斜角 θ の関係(迎角 $\alpha=0^\circ$)

4. 底面傾斜部周辺の流れ場特性

既往の研究により得られた知見や、前章で述べた結果より、五角形断面桁の静的空力特性には、上面剥離干渉角 β 、底面傾斜角 θ 、桁高 D 、ウェブ高 d など様々なパラメーターが相互に影響すると考えられる。そこでまず、五角形断面桁の静的空力特性に影響するパラメーターの中でも、底面傾斜角 θ の影響が大きいことに着目した。

実際の五角形断面桁においては、上下面の流れが相互に影響することが考えられるが、ここでは、底面傾斜角 θ が空気力係数に大きく影響したことから、下面側の流れの特性について詳細に検討することとした。そこで、**図-10** に斜線で示す底面傾斜部に着目し、可視化実験、熱線流速計を用いた物体周辺の流速測定を行い、底面傾斜角 θ による静的空力特性の違いに関する考察を行う。

(1) 実験概要

実験は一様流中で行い、九州工業大学付属の可視化実験用小型風洞(測定断面：高さ 400mm×幅 400mm)にて実施した。

実験には、断面図を**図-10**に示す断面幅 B が 122.5mm、模型長が 150.0mm であり、縮尺率が 1/90~1/110 程度のアクリル製模型を用いた。可視化手法としてはスモークワイヤー法を用いた。実験は、底面傾斜角 θ を 8°から

18°まで 2°刻みで変化させ、計 6 ケースについて行った。

可視化実験時の風洞内の風速は、可視化映像が良好であった 0.6m/s とした。流速測定には、熱線流速計およびスプリットフィルムプローブを用い、 θ が 12°の場合と 14°の場合について、断面周辺の流速を測定した。流速測定時の風洞内の風速は 6.0m/s とした。また、迎角は $\alpha=0^\circ$ とした。

流速測定の結果は、模型の風上端を原点、流れ主流方向に X 軸、主流直角方向に Y 軸とし、模型幅 B および高さ D で無次元化して整理している(**図-10**)。

(2) 実験結果および考察

a) 可視化実験

図-11(a) ~ (f)に、それぞれ底面傾斜角 θ が 8°, 10°, 12°, 14°, 16°, 18°場合の、迎角 $\alpha=0^\circ$ における可視化実験により得られた静止画を示す。

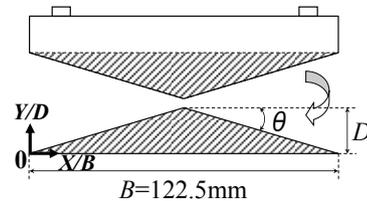


図-10 五角形断面桁底面傾斜部

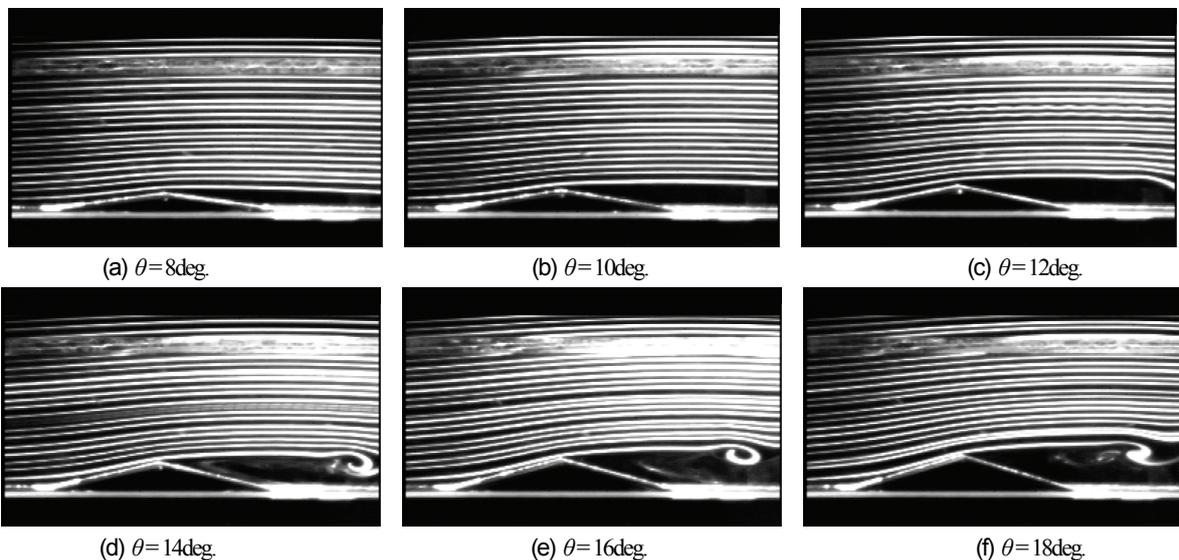


図-11 可視化実験静止画(迎角 $\alpha=0^\circ$)

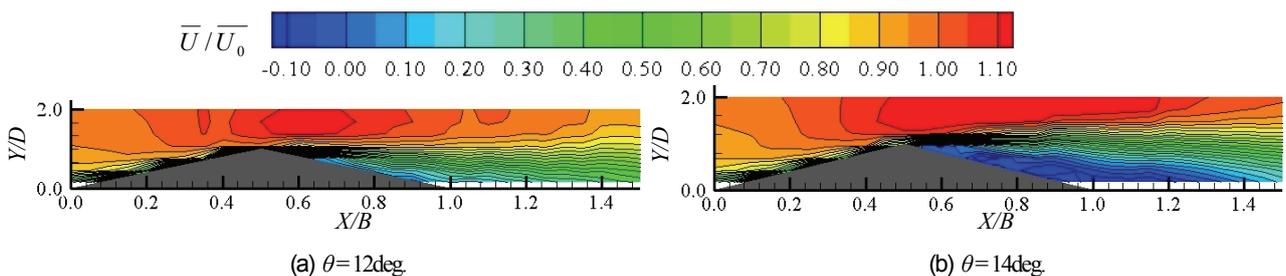


図-12 平均主流方向風速比分布図(迎角 $\alpha=0^\circ$)

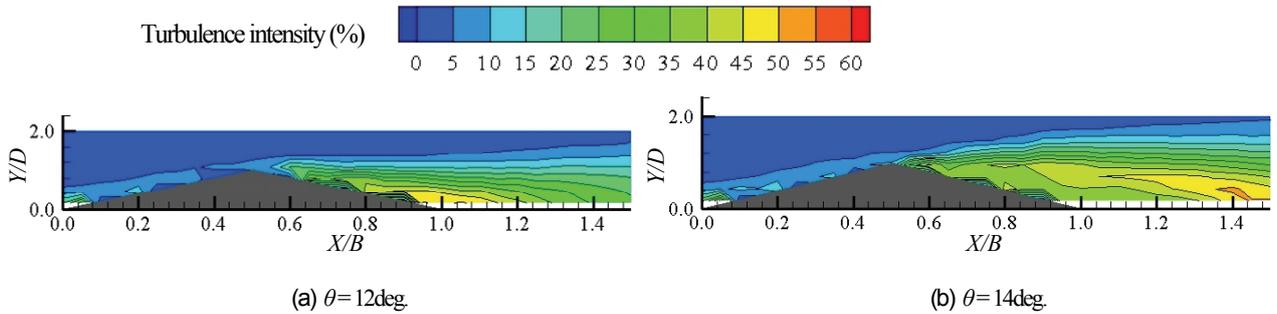


図-13 乱れ強さ分布図(迎角 $\alpha=0^\circ$)

まず、底面傾斜角 θ が 8° (図-11(a)), 10° (図-11(b))の場合の実験結果に着目すると、底面傾斜部周辺の流れ場にはほぼ乱れがない。また、底面傾斜角 θ が 12° の場合の実験結果(図-11(c))に着目すると、後流で流れが僅かに巻き込みを生じてはいるが、渦の生成などはない。

一方、底面傾斜角 θ が 14° (図-11(d)), 16° (図-11(e)), 18° (図-11(f))の実験結果に着目すると、底面傾斜部の頂点から剥離した流れが、後流で渦を生成している。

以上の結果より、より安定な静的空力特性を有していると考えられる、底面傾斜角 θ が $8^\circ\sim 12^\circ$ である場合では、底面傾斜部周辺の流れ場は乱れが小さく、後流での渦の生成などはない。静的空力特性が劣ると考えられる、底面傾斜角 θ が $14^\circ\sim 18^\circ$ である場合には、底面傾斜部の頂点から剥離した流れが、後流で渦を生成している。

b) 熱線流速計を用いた流速測定

熱線流速計およびスプリットフィルムプローブを用いた流速測定により得られた結果を、図-12 に流れ主流方向の平均風速比分布図、図-13 に乱れ強さ分布図として示す。(a)に底面傾斜角 θ が 12° の結果を、(b)に底面傾斜角 θ が 14° の結果を示している。また、それぞれの図の横軸は X/B 、縦軸は Y/D を示している。

ここで主流方向風速比とは、各測定点で測定された流れ主流方向の平均風速 \bar{U} を、各測定点測定時の風洞内風速の平均値 \bar{U}_0 で除して無次元化したものである。また乱れ強さとは、各測定点での風速の標準偏差(平均値を除いた変動成分の二乗平均の平方根)と、各測定点測定時の風洞内風速の平均値 \bar{U}_0 との比である。

図-12 より、 $\theta=12^\circ$ の場合、模型上面後流側から後流にかけての低風速域が $\theta=14^\circ$ の場合よりも狭くなっている。つまり、 $\theta=12^\circ$ の場合のほうが、底面傾斜部の頂点からの剥離が小さいことが考えられる。また、 $\theta=14^\circ$ の場合には、後流で平均主流方向風速比が負の値を示している領域があり、逆流が発生している。

図-13 より、 $\theta=12^\circ$ の場合、模型直後で乱れ強さが大きくなっている。 $\theta=14^\circ$ の場合、模型直後の逆流が生じている場所での乱れ強さは $\theta=12^\circ$ の場合ほど大きくなっておらず、 $X/B=1.4$ 付近で乱れ強さが大きな値となっている。これは可視化実験での渦の発生位置とほぼ一致

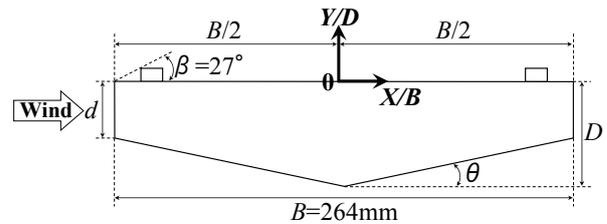


図-14 五角形断面桁模型断面図

している。

以上の結果より、より安定な静的空力特性を有していると考えられる、底面傾斜角 θ が 12° の場合、底面傾斜部の頂点からの剥離が小さく、後流での渦の生成や逆流の発生はない。一方、静的空力特性が劣ると考えられる、底面傾斜角 θ が 14° の場合、底面傾斜部の頂点からの剥離が大きく、剥離後、渦が生成し逆流が発生している。

つまり、底面傾斜角の僅かな違いは、底面傾斜部の頂点からの剥離の大きさに影響し、剥離後の流れ場が異なる。このため、静的空力特性が大きく異なると考えられる。

5. 五角形断面桁周りの圧力分布特性

前章で述べた結果は、上面およびウェブ高 d 、桁高 D の影響を考慮せずに下面側の流れの特性について検討した結果であり、実際の五角形断面桁周辺の流れ場特性とは異なる可能性がある。

そこで五角形断面桁を対象とし、静止状態において表面圧力測定を行い、五角形断面桁の静的空力特性が、底面傾斜角によって大きく異なるメカニズムに関する考察を行う。

(1) 実験概要

実験は、鹿島建設技術研究所付属の可視化風洞(測定断面：高さ 1200mm×幅 900mm)にて実施した。実験用模型として、縮尺率が $1/40\sim 1/50$ 程度に相当する 2 次元剛体模型を用いた。桁断面は図-14 に示す五角形断面であり、桁幅 B は 264.0mm、模型長は 880.0mm である。模

型には図-15 に示すように、圧力測定のために、模型のスパン方向の中央位置の断面周りに内径 1.5mm の圧力測定孔を、上面に 53 点、底面に 27 点、前背面に 3~6 点設けている。

実験ケースは、底面傾斜角が $\theta=12^\circ, 14^\circ$ のそれぞれにおいて幅員桁高比 B/D を $B/D=4.0, 4.5, 5.0$ と変化させた。また、上面剥離干渉角は $\beta=27^\circ$ とし、迎角は $\alpha=0^\circ$ とした。

表面圧力測定の測定時の風洞内風速は12.4m/sとし、一様流中にて実験を行った。

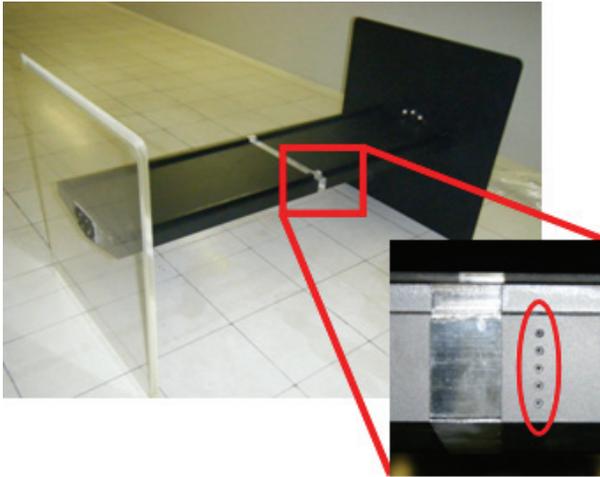


図-15 供試模型(圧力測定孔)

(2) 実験結果および考察

表面圧力測定の結果は、図-14に示すように、断面の上面中央を原点、流れ主流方向に X 軸、主流直角方向に Y 軸とし、それぞれ模型幅 B および高さ D で無次元化して整理している。

図-16に各面における正圧の向きを示し(概略図：上面は2測定点につき矢印1つ、側面は $B/D=5.0$ の場合)、断面まわりの平均圧力係数 C_{pm} を図-17に示す。なお、平均圧力係数 C_{pm} は式(4)のように定義する。

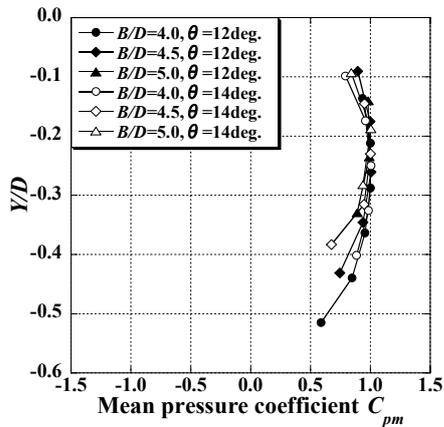
$$C_{pm} = \frac{1}{n} \sum (P_i - P_s) / q \quad (4)$$

P_i : 圧力の時系列データ、 P_s : 風洞内静圧
 q : 基準速度圧($=1/2 \cdot \rho U^2$, U : 風洞内風速)
 n : データ数

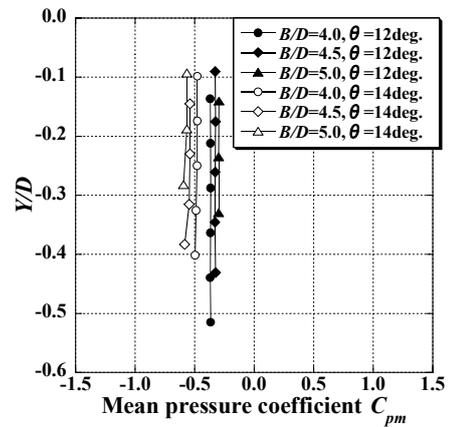


※上面：2測定点につき矢印1つ、側面： $B/D=5.0$ の場合

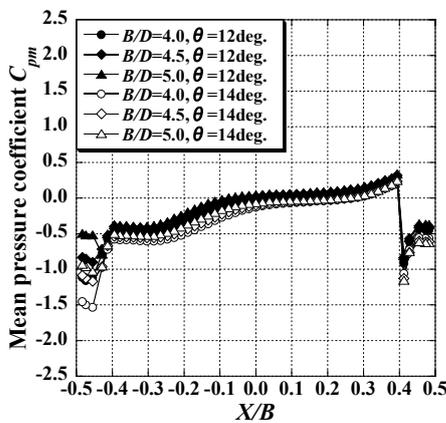
図-16 各面における正圧の向き(概略図)



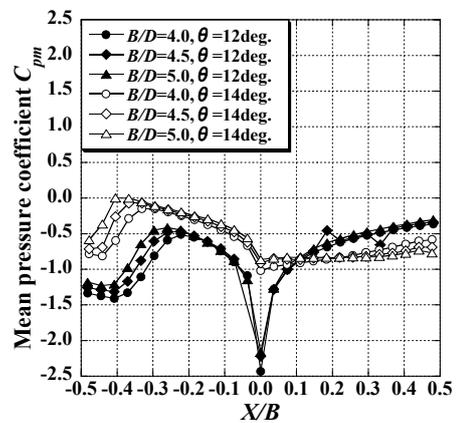
(a) 前面



(b) 背面



(c) 上面



(d) 底面

図-17 平均圧力係数 C_{pm} 分布

図-17(a)より前面においては、平均圧力係数 C_{pm} に断面の違いによる大きな差異は見られない。

図-17(b)より背面においては、全てのケースにおいてほぼ様な圧力分布を示している。 $\theta=14^\circ$ の場合では $C_{pm}=-0.59\sim-0.48$ 程度、 $\theta=12^\circ$ の場合では $C_{pm}=-0.37\sim-0.30$ 程度である。いずれの B/D においても $\theta=14^\circ$ の場合の方が、負圧の絶対値が大きい傾向にある。

図-17(c)より上面においては、上流端付近での平均圧力係数 C_{pm} は、どちらの θ においても、 B/D が小さくなるに従い負圧の絶対値が大きくなる傾向がある。また、上流端以外の部分においては、さほど大きな差異は見られず、底面傾斜角の違いが上流端以外の部分に作用する表面圧力に及ぼす影響は小さいと考えられる。

図-17(d)より底面においては、どちらの θ においても底面全体に負圧が働く。 $\theta=12^\circ$ の場合には、上流端付近で $C_{pm}=-1.41\sim-1.23$ 、底面傾斜部の頂点で $C_{pm}=-2.43\sim-2.16$ と、負圧の絶対値が特に大きい値を示している。 $\theta=14^\circ$ の場合には、上流側よりも下流側の方が、平均的に負圧の絶対値が大きくなっている。 B/D の違いに着目すると、上流端付近で生じる負圧が、どちらの θ においても、 B/D が小さくなるにしたがって絶対値が大きくなる傾向を示している。

このように、 $\theta=12^\circ$ の場合に底面の上流端および頂点付近の負圧の絶対値が大きく、また背面の負圧の絶対値が小さくなるのは、底面の上流端および頂点付近の流速が早く、後流渦の巻き込み位置がより下流側となっているためと考えられる。

ここで式(5)に示すように、五角形断面桁の断面中央より上流側と下流側の平均圧力係数 C_{pm} の抗力方向成分の差を、抗力方向平均圧力係数 C_{dm} と定義する。また式(6)に示すように、上面と底面の平均圧力係数 C_{pm} の揚力方向成分の差を揚力方向平均圧力係数 C_{lm} と定義する。抗力方向平均圧力係数 C_{dm} は流れ主流方向を正とし、揚力方向平均圧力係数 C_{lm} は主流方向に対し、鉛直上向き

を正とする。

$$C_{dm}(Y) = C_{pmd}(Y)|_{Front} - C_{pmd}(Y)|_{Back} \quad (5)$$

$$C_{lm}(X) = C_{pml}(X)|_{Lower} - C_{pml}(X)|_{Upper} \quad (6)$$

C_{pmd} : 平均圧力係数の抗力方向成分

C_{pml} : 平均圧力係数の揚力方向成分

図-18に縦軸を Y/D 、横軸を抗力方向平均圧力係数 C_{dm} として整理した、抗力方向平均圧力係数 C_{dm} 分布図を示す。図-18より、五角形断面桁のウェブ($Y/D=-0.5\sim 0.0$ 付近)および、底面傾斜部の上流端付近($Y/D=-0.7\sim-0.5$ 付近)に働く抗力が、 $\theta=12^\circ$ の場合の方が $\theta=14^\circ$ の場合よりも小さい傾向にある。これは、 $\theta=12^\circ$ の場合において、 $\theta=14^\circ$ の場合よりも背面に働く負圧の絶対値が小さいことや、底面傾斜部の上流端に働く負圧の絶対値が大きいことによると考えられる。

図-19に縦軸を揚力方向平均圧力係数 C_{lm} 、横軸を X/B として整理した揚力方向平均圧力係数 C_{lm} 分布図を示す。図-19より、五角形断面桁の中央付近より上流側($X/B=-0.5\sim 0.0$)に働く揚力に大きな差が生じており、 $\theta=12^\circ$ の場合の方が、負の揚力が大きい傾向を示している。これは、 $\theta=12^\circ$ の場合において、底面傾斜部の上流端および頂点付近に働く負圧の絶対値が大きいことによると考えられる。また、抗力方向平均圧力係数 C_{dm} 、揚力方向平均圧力係数 C_{lm} のいずれにおいても B/D の違いによる大きな差は見られない。

以上の結果について、三分力測定結果と比較して考察すると、三分力測定の結果では各空気力係数が底面傾斜角が $\theta=12^\circ$ の場合の方が、 $\theta=14^\circ$ の場合よりも小さくなっているが、これは、 $\theta=12^\circ$ の場合の方が、背面に働く負圧の絶対値が小さいことや、 $\theta=12^\circ$ の場合に底面傾斜部の上流端付近や頂点付近に、絶対値が大きい負圧が働くことによると考えられる。

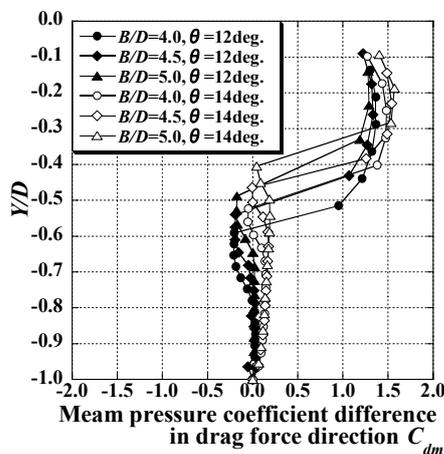


図-18 抗力方向平均圧力係数 C_{dm} 分布

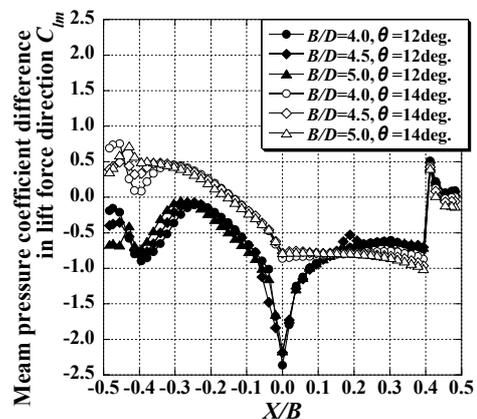


図-19 揚力方向平均圧力係数 C_{lm} 分布

6. 結論

本論文では、五角形断面桁を対象として、上面剥離干渉角を $\beta=27^\circ$ とし、静止状態での各種風洞実験を行い、五角形断面桁の静的空力特性を明確にした。さらに、五角形断面桁の静的空力特性が、底面傾斜角によって大きく異なるメカニズムに関して検討した。以上の検討結果から得られた知見をまとめると、以下のようになる。

- 1) 五角形断面桁の静的空力特性は、底面傾斜角 θ や桁高 D によって異なる。特に底面傾斜角 θ の影響が大きく、底面傾斜角の僅かな違いでもその静的空力特性は大きく異なる。上面剥離干渉角を $\beta=27^\circ$ とした場合においては、底面傾斜角 θ が 11° から 12° である場合に、図6~8で示したように迎角に対して鈍感で、空力的により安定な三分力特性を有する。
- 2) 底面傾斜部のみを対象とすると、底面傾斜角 θ が 12° である場合には、底面傾斜部周辺の流れ場に乱れがほとんどない。また、底面傾斜部の頂点からの剥離が小さく、底面傾斜部の後流においては渦や逆流の発生はない。一方、底面傾斜角 θ が 14° である場合には、底面傾斜部の頂点からの剥離が大きく、剥離後、渦や逆流が発生する。
- 3) 五角形断面桁の表面圧力特性に与える底面傾斜角 θ の影響は、上面剥離干渉角を $\beta=27^\circ$ とした場合、桁断面の前面および上面においては小さい。背面においては、底面傾斜角 θ が 12° の場合の方が、 14° の場合よりも作用する負圧の絶対値が小さい。また底面においては、底面傾斜角 θ が 12° の場合、上流端付近および頂点付近に作用する負圧の絶対値が特に大きい。このため、底面傾斜角 θ の僅かな違いでも静的空力特性が大きく異なる。

以上のことから、五角形断面桁において、底面傾斜角が $\theta=12^\circ$ である場合、底面傾斜部の頂点からの剥離が小さい。底面傾斜角が $\theta=14^\circ$ である場合、底面傾斜部の頂点からの剥離が大きく、渦が発生する。また、底面傾斜角が $\theta=12^\circ$ である場合、底面上流端および頂点付近に作用する負圧の絶対値が特に大きい。一方、底面傾斜角が $\theta=14^\circ$ である場合、底面上流端および頂点付近に作用する負圧の絶対値はさほど小さくなく、底面下流側や背面

に作用する負圧の絶対値が大きくなる。このため、底面傾斜角が異なると三分力特性も大きく異なり、底面傾斜角が $\theta=12^\circ$ の場合に迎角の変化に対しても空力的により安定な三分力特性を有すると考えられる。

7. 今後の検討課題

本論文では、一様流中における静止状態での各種実験結果より、五角形断面桁の静的空力特性および、その静的空力特性が底面傾斜角によって大きく異なるメカニズムに関する検討を行った。

今後、静止状態における五角形断面桁周りの流れ場特性についての検討を行っていく予定である。さらに、振動状態における五角形断面桁の対風特性や、そのメカニズムについての検討、乱流中における五角形断面桁の対風特性に関する検討を行っていく予定である。

また、本論文では上面剥離干渉角を $\beta=27^\circ$ として検討を行い、実験結果は $\beta=27^\circ$ の場合に限られるものである。しかし、 $\beta=27^\circ$ が最適な角度であるかは解明できておらず、上面側の流れが下面側の流れに影響する可能性もあるため、上面剥離干渉角を変化させた検討が必要である。

参考文献

- 1) 社団法人日本構造協会：構造物の耐風工学, pp. 20-23, 東京電機大学出版局, 1997.
- 2) 久保喜延, 吉田健太, 辻栄治, 木村吉郎, 加藤九州男：五角形断面桁の空力特性に与える底面傾斜角の影響, 第19回風工学シンポジウム論文集, pp. 295-300, 2006.
- 3) Kubo, Y., Yoshida, K., Tsuji, E., Kimura, K. and Kato, K.: Development of aerodynamically stable bridge girder cross section for long span bridges, *Proc. of 12th International Conference on Wind Engineering (ICWE12)*, pp. 239-246, 2007.
- 4) 久保喜延, 本多健二, 田崎賢治：剥離干渉効果によるPC斜張橋開断面桁の耐風性能改善法, 第12回風工学シンポジウム論文集, pp. 399-404, 1992.
- 5) 久保喜延, 小石明, 田崎賢治, 中桐秀雄：橋梁断面における空力干渉作用メカニズムについて, 第13回風工学シンポジウム論文集, pp. 353-358, 1994.
- 6) 岡内功, 伊藤学, 宮田利雄：耐風構造, 丸善, 1977.

(2008. 11. 10 受付)

THE EFFECTS OF LOWER FLANGE SLOPE ON THE AERODYNAMIC STABILITY OF A PENTAGONAL CROSS-SECTION GIRDER

Tatsunori NODA, Yoshinobu KUBO, Kichiro KIMURA, Kusuo KATO,
Kazumasa OKUBO and Kenta YOSHIDA

The authors clarified the aerodynamic characteristics of the pentagonal cross-section girder that might have enough aerodynamic stability without using additional devices and investigated the aerodynamic stable mechanism by conducting various wind tunnel tests in a static state. As a result, it was found that the aerodynamic characteristics of the girder depend on the lower flange slope because the magnitude of the flow separation from the lower slope portion depend on the lower flange slope and the pressure distributions are different based on the lower flange slope, and the girder corss-section with the lower flange slope of 12deg. is the most recommended for the girder for the cable-stayed bridge.